

*Абрамов Ю.А., д-р техн. наук, гл. науч. сотр., НУГЗУ,
Гвоздь В.М., канд. техн. наук, нач. ТУГСЧСУ в Черкасской обл.,
Тищенко А.М., канд. техн. наук., нач. каф., ЧАПБ*

МОДЕЛИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ БОЕПРИПАСОВ В КУЗОВЕ АВТОМОБИЛЯ

Применительно к транспортировке опасных грузов, например, боеприпасов, с использованием автомобильного транспорта получены модели возмущений, которые представлены в виде компонентов спектральных плотностей и дисперсий линейных и угловых ускорений кузова автомобиля при его эволюциях в пространстве

Ключевые слова: опасный груз, автомобильный транспорт, возмущения, линейные и угловые ускорения

Постановка проблемы. Расширение номенклатуры опасных грузов при их транспортировке различными транспортными средствами неразрывно связано с повышением уровня безопасности этого процесса. В последнее время наметилась тенденция к транспортировке в качестве таких опасных грузов боеприпасов и, в частности, боеприпасов, которые находились в режиме длительного хранения. Как правило, транспортировка таких опасных грузов на первом этапе осуществляется с помощью автомобильного транспорта, вследствие чего эти грузы подвержены возмущениям, уровень которых может превысить критическое значение. В этой связи имеет место проблема обеспечения безопасной транспортировки опасных грузов, в частности, автомобильным транспортом в условиях внешних возмущений, обусловленных эволюцией в пространстве кузова автомобиля.

Анализ последних исследований и публикаций. Транспортировке опасных грузов посвящено достаточно много публикаций. Применительно к безопасности такой транспортировки при движении автомобиля с учетом неровностей дороги следует выделить [1]. Однако в этой работе авторы ограничиваются учетом вариаций механических свойств материалов транспортного средства и не учитывают эволюции в пространстве самого автомобиля.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является математическое описание возмущений, имеющих место при

Модели возмущений при транспортировке боеприпасов в кузове автомобиля

транспортировке опасных грузов, в частности, боеприпасов, в кузове автомобиля.

При движении автомобиля имеет место эволюция его кузова в пространстве, которая обусловлена как неровностью опорной поверхности, так и ее трансформацией через подвеску как динамической системы. Для определения положения кузова автомобиля в пространстве введем системы координат:

– O_0XYZ , оси которой неподвижны, причем ось O_0X горизонтальна и направлена по линии заданного курса, ось O_0Z направлена вертикально вверх (рис. 1), а начало O_0 совпадает в начальный момент с центром тяжести автомобиля;

– $O\xi\eta\zeta$, оси которой параллельны осям системы O_0XYZ и движутся поступательно с автомобилем – земная система координат;

– $Oxyz$, оси которой связаны с кузовом автомобиля, причем ось Ox совпадает с его продольной осью, ось Oy – с поперечной осью, ось Oz нормальна плоскости кузова.

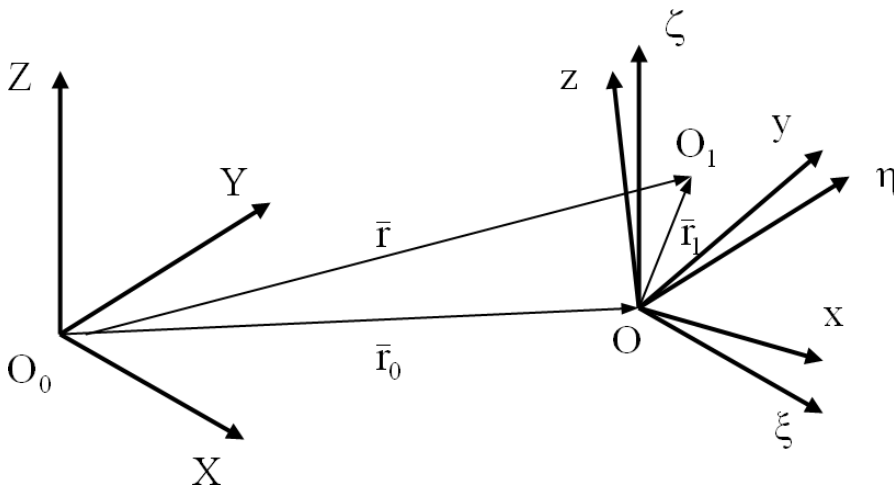


Рис. 1 – К определению положения кузова автомобиля

Положение ЦТ кузова автомобиля относительно системы O_0XYZ определяется радиусом-вектором $\bar{r}_0 = \{\xi_0, \eta_0, \zeta_0\}$. Взаимное угловое положение систем $O\xi\eta\zeta$ и $Oxyz$ определяется углами рыскания ϕ , продольного ψ и поперечного θ крена (рис. 2). Преобразование системы координат $O\xi\eta\zeta$ к $Oxyz$ имеет вид

$$[x, y, z] = B[\xi, \eta, \zeta], \quad (1)$$

где B – преобразующая матрица, имеющая вид

$$B = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \psi & -\sin \phi \\ \cos \phi \sin \psi \sin \theta - \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \psi \sin \theta & \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta + \cos \phi \sin \psi \cos \theta & \sin \phi \sin \psi \cos \theta - \cos \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для малых углов ϕ , ψ и θ матрица (2) трансформируется к виду

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \phi & -\psi \\ -\phi & 1 & \theta \\ \phi & -\theta & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Введем в рассмотрение полуподвижную систему $O\xi_1\eta_1\zeta_1$ (рис. 2), развернутую относительно системы $O\xi\eta\zeta$ вокруг оси $O\zeta$ на угол ϕ , а также географическую систему $ONE\xi$, у которой ось ON направлена на север, а ось OE – на восток.

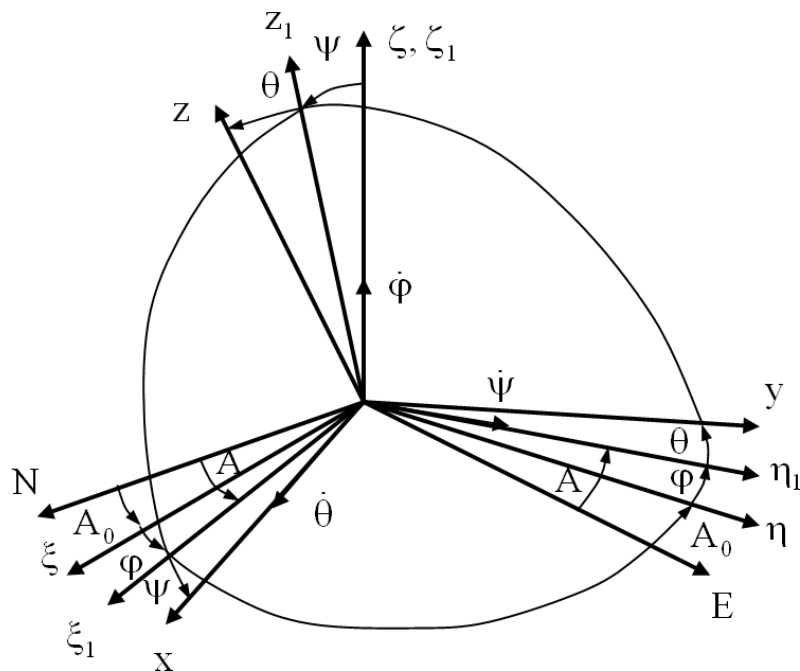


Рис. 2 – Угловые координаты, характеризующее положение кузова автомобиля

Преобразование системы $O\xi_1\eta_1\zeta_1$ к системе $Oxyz$ осуществляется с помощью матрицы B_1 , получаемой из (2) при $\phi = 0$, т.е.

$$[x, y, z] = B_1 [\xi_1, \eta_1, \zeta_1], \quad (4)$$

где

$$B_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ \sin \psi \sin \theta & \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Преобразование системы $ONE\xi$ к $Oxyz$ осуществляется с помощью матрицы B_2 , которая совпадает с матрицей (2) при $\phi = A$, где $A = A_0 + \phi$ – курс автомобиля, A_0 – заданный курс. Вследствие того, что $\phi \ll A_0$, то

$$\sin A \cong \sin A_0 + \cos A_0; \quad \cos A \cong \cos A_0 - \phi \sin A_0. \quad (6)$$

Угловая скорость кузова автомобиля $\bar{\omega}$ в соответствии с рис. 2 определяется выражением

$$\bar{\omega} = \dot{\phi} \bar{\zeta}_1^0 + \dot{\psi} \bar{\eta}_1^0 + \dot{\theta} \bar{x}^0 \quad (7)$$

или

$$\bar{\omega} = \omega_x \bar{x}^0 + \omega_y \bar{y}^0 + \omega_z \bar{z}^0, \quad (8)$$

где $\bar{\zeta}_1^0$, $\bar{\eta}_1^0$, \bar{x}^0 – орты соответствующих координатных осей; ω_x , ω_y , ω_z – проекции вектора $\bar{\omega}$ на оси системы $Oxyz$, т.е.

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\phi} \sin \psi; \quad \omega_y = \dot{\phi} \cos \psi \sin \theta + \dot{\psi} \cos \theta; \\ \omega_z &= \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta - \dot{\psi} \sin \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

С точностью до величины первого порядка выражение (9) можно переписать следующим образом

$$\omega_x = \dot{\theta}; \quad \omega_y = \dot{\psi}; \quad \omega_z = \dot{\phi}. \quad (10)$$

Абсолютное ускорение кузова автомобиля можно представить в виде

$$\bar{W} = \bar{W}_r + \bar{W}_c + \bar{W}_e = \bar{W}_0 + \bar{W}_e, \quad (11)$$

где \bar{W}_r – относительное ускорение кузова; \bar{W}_c – кориолисово ускорение; \bar{W}_e – ускорение кузова автомобиля, обусловленное его эволюцией в пространстве.

В проекциях на оси систем $O\xi\eta\zeta$ и $O\xi_1\eta_1\zeta_1$ при условии, что $W_{\zeta_1} = W_{\zeta}$, имеем

$$\begin{aligned} W_{\xi} &= W_{\xi}^0 + W_{\xi}^e; \quad W_{\eta} = W_{\eta}^0 + W_{\eta}^e; \quad W_{\zeta} = W_{\zeta}^0 + W_{\zeta}^e + g; \\ W_{\xi_1} &= W_{\xi_1}^0 + W_{\xi_1}^e; \quad W_{\eta_1} = W_{\eta_1}^0 + W_{\eta_1}^e, \end{aligned} \quad (12)$$

где g – ускорение силы тяжести.

В системе $ONE\zeta$ при движении автомобиля со скоростью v и заданным курсом A_0 имеем

$$\begin{aligned} W_N^0 &= \dot{V}_N + \frac{V_E^2}{R} \operatorname{tg} \phi_0 + 2\Theta v_E \sin \phi_0; \\ W_E^0 &= \dot{v}_E - \frac{v_E v_N}{R_z} \operatorname{tg} \phi_0 - 2\Theta v_N \sin \phi_0; \\ W_{\zeta}^0 &= -\frac{v_N^2 + v_E^2}{R} - 2\Theta v_E \cos \phi_0, \end{aligned} \quad (13)$$

где v_N и v_E – северная и восточная составляющие скорости автомобиля

$$v_N = v \cos A; \quad v_E = v \sin A;$$

Θ – угловая скорость вращения Земли; R – радиус Земли; ϕ_0 – географическая широта.

Вследствие того, что

$$W_{\xi}^0 = W_E^0 \cos A - W_N^0 \sin A; \quad W_{\eta}^0 = W_E^0 \sin A + W_N^0 \cos A, \quad (14)$$

можно записать в системе $O\xi\eta\zeta$

$$\begin{aligned}
W_{\xi}^0 &= -\frac{v^2}{R}(\sin A_0 + \phi \cos A_0) \operatorname{tg} \phi_0 - 2\Theta v \sin \phi_0 + v\dot{\phi}; \\
W_{\eta}^0 &= -\frac{v^2}{R}(\sin A_0 + \phi \cos A_0) \operatorname{tg} \phi_0 + 2\Theta v \sin \phi_0 - v\dot{\phi}; \\
W_{\zeta}^0 &= -\frac{v^2}{R} - 2\Theta v(\sin A_0 + \phi \cos A_0) \cos \phi_0.
\end{aligned} \tag{15}$$

Анализ свидетельствует, что для средних широт при $v \leq 15 \text{ мс}^{-1}$ выражение (15) можно упростить до вида

$$\begin{aligned}
W_{\xi}^0 &= -\frac{v^2}{R} \sin A_0 \operatorname{tg} \phi_0 - 2\Theta v \sin \phi_0 + v\dot{\phi}; \\
W_{\eta}^0 &= -v\dot{\phi}; \quad W_{\zeta}^0 = -\frac{v^2}{R} - 2\Theta v \sin A_0 \cos \phi_0.
\end{aligned} \tag{16}$$

Для составляющих скорости имеет место (см. рис. 2)

$$\begin{bmatrix} v_{\xi}^e \\ v_{\eta}^e \\ v_{\zeta}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\xi}_0 \\ \dot{\eta}_0 \\ \dot{\zeta}_0 \end{bmatrix} + B^{-1} \begin{bmatrix} \omega_y z & -\omega_z y \\ \omega_z x & -\omega_z z \\ \omega_x y & -\omega_y x \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Тогда с учетом (3), (9) и после дифференцирования для составляющих вектора \bar{W}^e можно записать

$$W_{\xi}^e = \ddot{\xi}_0 - y\ddot{\phi} + z\ddot{\psi}; \quad W_{\eta}^e = \ddot{\eta}_0 - x\ddot{\phi} - z\ddot{\theta}; \quad W_{\zeta}^e = \ddot{\zeta}_0 - x\ddot{\psi} + y\ddot{\theta}. \tag{18}$$

В системе $O\xi_1\eta_1\zeta_1$ для составляющих вектора \bar{W}_0 имеет место (при малых значениях угла ϕ)

$$W_{\xi_1}^0 = W_{\xi}^0 - W_{\eta}^0 \phi; \quad W_{\eta_1}^0 = W_{\eta}^0 + W_{\xi}^0 \phi; \quad W_{\zeta_1}^0 = W_{\zeta}^0, \tag{19}$$

что с учетом (6) приводит к

$$W_{\xi_1}^0 = -\frac{v^2}{R}(1 + \phi^2)(\sin A_0 + \phi \cos A_0) \operatorname{tg} \phi_0 - 2\Theta v(1 + \phi^2) \sin \phi_0 + v\dot{\phi};$$

$$W_{\eta_1}^0 = 0; W_{\zeta_1}^0 = -\frac{v^2}{R} - 2\Theta v (\sin A_0 + \phi \cos A_0) \cos \phi_0. \quad (20)$$

Анализ (20) свидетельствует, что для средних широт, а также с учетом реальных значений ϕ , $\dot{\phi}$ и при $v \leq 15 \text{ мс}^{-1}$ имеет место

$$\begin{aligned} W_{\xi_1}^0 &= -\frac{v^2}{R} \sin A_0 \operatorname{tg} \phi_0 - 2\Theta v \sin \phi_0 + v \dot{\phi}; \\ W_{\eta_1}^0 &= 0; W_{\zeta_1}^0 = -\frac{v^2}{R} - 2\Theta v \sin A_0 \cos \phi_0. \end{aligned} \quad (21)$$

Анализ (16) и (21) показывает, что они практически совпадают, учитывая, что составляющая $V\dot{\phi}\phi$ обычно мала.

Составляющие вектора \bar{W}_e в системе $O\xi_1\eta_1\zeta_1$ с точностью до малых величин первого порядка совпадают с (18).

С учетом приведенных соображений для стационарных случайных процессов модель возмущений может быть представлена в терминах спектральных плотностей $S_i(\omega)$

$$\begin{bmatrix} S_1(\omega) \\ S_2(\omega) \\ S_3(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\xi_0}(\omega) + y^2 S_{\dot{\phi}}(\omega) + z^2 S_{\ddot{\psi}}(\omega) + v^2 S_{\dot{\phi}}(\omega) \\ S_{\eta_0}(\omega) + x^2 S_{\dot{\phi}}(\omega) + z^2 S_{\ddot{\theta}}(\omega) \\ S_{\zeta_0}(\omega) + x^2 S_{\ddot{\psi}}(\omega) + y^2 S_{\ddot{\theta}}(\omega) + 2x S_{\zeta_0\ddot{\psi}}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где $i=1 - W_{\xi}^e$; $i=2 - W_{\eta}^e$; $i=3 - W_{\zeta}^e$; $S_{\xi_0}(\omega), \dots, S_{\ddot{\theta}}(\omega)$ – спектральные плотности соответственно линейных и угловых ускорений; $S_{\dot{\phi}}(\omega)$ – спектральная плотность угловой скорости рыскания; $S_{\zeta_0\ddot{\psi}}(\omega)$ – взаимная спектральная плотность случайных процессов $\zeta_0(t)$ и $\ddot{\psi}(t)$.

В том случае, когда боеприпасы размещаются вблизи ЦТ кузова автомобиля, можно положить, что

$$x \cong y \cong 0,$$

вследствие чего из (22) следует модель возмущений в терминах дисперсий ускорений D_i

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(\ddot{\xi}_0) + z^2 D(\ddot{\psi}) + v^2 D(\dot{\phi}) \\ D(\ddot{\eta}_0) + z^2 D(\ddot{\theta}) \\ D(\ddot{\xi}_0) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Выражения (22) и (23) определяют общие математические модели возмущений для боеприпасов, размещенных в кузове автомобиля, который совершает линейные и угловые эволюции в пространстве.

Выводы. Получены математические модели для возмущений применительно к транспортировке опасных грузов (боеприпасов) автомобильным транспортом, которые представлены в виде составляющих по осям координат для спектральных плотностей и дисперсий линейных и угловых ускорений кузова автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко И.В. Решение задачи надежности при транспортировке опасных грузов с учетом разброса механических свойств материалов / И.В. Мищенко, Г.А. Чернобай // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2010. – Вип. 12. – С. 104-108.

Абрамов Ю.О., Гвоздь В.М., Тищенко О.М.

Моделі збурень при транспортуванні боеприпасів в кузові автомобіля

Стосовно транспортування небезпечних вантажів, наприклад, боеприпасів, з використанням автомобільного транспорту отримано моделі збурень, які представлено у вигляді компонентів спектральних густин і дисперсій лінійних і кутових прискорень кузова автомобіля при його еволюції в просторі

Ключові слова: небезпечний вантаж, автомобільний транспорт, лінійні та кутові прискорення

Abramov Y.A., Gvozd V.M., Tischenko A.M.

Models of perturbations in transit ammunition in the vehicle

Models of perturbations for the transporting of dangerous goods like ammunition by vehicle are constructed. They are presented as components of spectral density and variance of the linear and angular accelerations of the car body under its evolutions.

Key words: dangerous goods, vehicle, perturbations, linear and angular accelerations